

〔美〕L·E·尼尔生 著 丁佳鼎 译

高分子和复合材料的力学性能

轻工业出版社

131.2

高分子和复合材料的力学性能

[美] L. E. 尼尔生著

丁佳鼎 译

轻工业出版社

内 容 提 要

本书详细阐述了高分子的力学性能和各种环境因素及结构因素对力学性能的影响。同时对高分子复合材料的力学性能也进行了系统而全面的论述。

本书注意理论联系实际,既适合从事高分子和高分子复合材料工作的工程技术人员参考,又可供大专院校有关专业师生阅读。

Mechanical Properties
of Polymers and Composites
LAWRENCE E. NIELSEN
MARCEL DEKKER, INC. New York 1974

本书根据纽约马塞耳德克公司 1974 年版译出

高分子和复合材料的力学性能

【美】 L. E. 尼尔生著

丁佳鼎 译

*

轻工业出版社出版

(北京阜成路 3 号)

张家口地区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

787×1092 毫米 1/32 印张: 12²⁴/32 字数: 276 千字

1981 年 3 月 第一版第一次印刷

印数: 1—6,000 定价: 1.30 元

统一书号: 15042·1569

译 者 的 话

本书是根据美国 L. E. 尼尔生(Lawrence E. Nielsen)所著《高分子和复合材料的力学性能》(《Mechanical Properties of Polymers and Composites》)一书(一九七四年版)译出的。

书中详细论述了高分子的力学性能和各种环境因素及结构因素对力学性能的影响。同时对高分子复合材料的力学性能也进行了比较系统而完整地论述。这在同类书中是少见的。

诚如原作者在序言中所说,本书通俗易懂,注意理论联系实际。所有论述都把一般原理、有用的经验法则和实用的数学关系式作为重点,同时注意到近年来在实验和理论方面的发展。书中选列了最重要的参考文献,并作了必要的说明。

本书可供从事高分子和高分子复合材料工作的工程技术人员以及大专院校高分子专业师生参考。

专业词汇的翻译,尽量参照国内出版的有关词典,采用通用译名,对一些还未能统一的专门词汇,翻译时力求使译名切合其实际含义,并注意到习惯用法。

译文曾由唐均蓓、徐支祥两同志校阅,在此谨致谢意。

由于译者的水平所限,译文的缺点和错误在所难免,热诚希望读者批评指正。

译 者

一九七九年一月

原 著 者 序

高分子物质是价格较为便宜，而其重要性可与金属媲美的大量使用的结构材料。主要由于高分子材料具有从柔软的弹性体到硬质材料的多种力学性能，所以得到广泛的应用和飞速的发展。为数众多的资历不同、兴趣不同的工作人员都有必要了解一些高分子力学性能方面的知识。自从有关高分子力学性能的一本较新的书出版以来已经有十年了，该书通俗易懂，一般科技人员，不必一定是高分子方面的专家，就能看懂，而该书内容丰富，且有一定深度，对高分子专业人员也颇有用处。

现在许多大学都设有高分子或高分子材料专业，并正在开设更多的有关高分子工学的课程。本书每章列有习题，适合于作高分子力学性能课程一学期教学之用。书中许多内容，曾在华盛顿大学教学中试验过。近年来，工业研究所，已较少重视高分子的合成，而更多地重视高分子材料力学性能及其应用方面的研究。由于这类高分子新材料，正在越来越多的用途上取代金属和玻璃，所以设计人员也就不得不具有高分子材料的粘弹性和力学性能方面的知识。生产人员也比从前更清楚地认识到影响产品力学性能的许多因素（如分子量、热处理、分子取向等）的重要性。这样就很需要有一本初、中等水平的，讨论高分子力学性能的书。本书的目的就在于在分子力学性能和分子复合材料方面，满足人们的此项需要。

本书概略地论述了与环境因素和结构因素有关的高分子力学性能。环境因素包括：时间、温度、外界压力及负荷大小。结构因素包括：分子量、支化、交联、共聚合、增塑、结晶性和微结晶形态、分子取向及嵌段共聚。在所有这些论述中，都把重点放在一般原理、有用的经验法则及实用的数学关系式上。对一些普通高分子物质特有的力学性能，也广泛地提到。同时也着重注意到近年来在实验和理论方面的发展。

高分子复合材料，是目前研究和发展的主要领域。复合材料正在迅速成为重要而有价值的结构材料，很可能高分子应用的下一个主要领域，就是在复合材料方面了。因此，本书的第二个目的是以简单易懂的方式对高分子复合材料的力学性能加以完整的描述。到目前为止，还没有一本其它著作，对复合材料的全部力学性能，包括微粒子填充材料、纤维填充材料、泡沫材料、高冲击性高分子和聚合物的混合物等作过全面的论述，可以和本书相比。其它一些书，或者只是谈到复合材料领域内的某几方面，或者是太偏于数学方面，不适合于大多数科技人员，他们需要的是复合材料的实用知识。许多复合材料与过去使用的材料完全不同，它们是各向异性的，也就是说，它们的力学性能在不同的方向上可以是完全不一样的。而大多数科技人员，往往只熟悉各向同性的材料，因此，本书对各向异性进行了初等水平的较详细的论述。

作者广泛地参考了有关文献，并试图把其中最重要的和一些能说明某一问题的文献选出来。毫无疑问，有一些重要文献可能被遗漏了。但作者希望通过把数以万计的内容空洞无物的文献剔除，也是对读者作一件有益的事。这样，对任何一个特定课题，读者只要查阅一下所列参考文献，就能容易而迅速地了解到在这方面过去已作过什么工作。

作者在写本书过程中曾得到多方面帮助，这里不再一一鸣谢。同人中看过本书原稿并曾提出宝贵意见的有：约瑟夫·贝高米 (Joseph Bergomi)、鲁夫·布克达耳 (Rolf Buchdahl)、梅文·海瑞克 (Melvin Hedrick)、迈伦·霍姆 (Myron Holm)、艾伦·肯尼恩 (Allen Kenyon)、詹姆斯·库兹 (James Kurz)、杜马斯·路易斯 (Thomas Lewis)、艾里·贝瑞 (Eli Perry) 和詹姆斯·伍德布雷 (James Woodbrey)。

L. E. 尼尔生
(Lawrence E. Nielsen)

目 录

第一章 力学试验和高分子物质的转变	1
第一节 导论	1
第二节 力学试验	2
一 蠕变试验	4
二 应力松弛试验	5
三 应力-应变试验	5
四 动力学试验	8
五 其它试验	12
第三节 玻璃化转变	13
一 化学结构和 T_g	14
二 结构因素对 T_g 的影响	16
第四节 结晶性	19
一 熔点	21
第五节 习题	22
参考文献	24
第二章 弹性模量	29
第一节 各向同性材料和各向异性材料	29
一 各向同性材料	29
二 各向异性材料	29
第二节 弹性模量测定法	32
一 杨氏模量	32
二 从振动频率求杨氏模量和剪切模量	34
第三节 弹性模量和分子结构的关系	36

一 分子量的影响	37
二 交联的影响	38
三 结晶度的影响	39
四 共聚合和增塑作用	40
五 嵌段、接枝聚合物和复合高聚物	41
第四节 习题	42
参考文献	45
第三章 蠕变和应力松弛	50
第一节 导论	50
第二节 模型	51
第三节 松弛和延迟时间的分布	55
第四节 叠加原理	57
第五节 温度的影响	64
第六节 蠕变和应力的关系	65
第七节 应力松弛和变形的关系	68
第八节 压力的影响	69
第九节 热处理	69
第十节 分子量的影响; 流变性	70
第十一节 增塑剂对熔融粘度的影响	76
第十二节 交联	77
第十三节 结晶性	81
第十四节 共聚合和增塑作用	86
第十五节 取向的影响	87
第十六节 嵌段聚合物和复合聚合物	88
第十七节 小结	90
第十八节 习题	91
参考文献	94

第四章 动力学性质	104
第一节 导论和仪器	104
第二节 温度和频率的影响	107
第三节 应力或变形振幅的影响	119
第四节 热履历	121
第五节 分子量的影响	124
第六节 交联的影响	127
第七节 结晶度和结晶形态的影响	133
第八节 增塑剂和共聚合的影响	137
第九节 分子取向的影响	142
第十节 分子间力强度的影响	147
第十一节 复合聚合物、嵌段和接枝共聚物	150
第十二节 二次玻璃化转变	156
第十三节 小结	166
第十四节 习题	167
参考文献	171
第五章 应力-应变性能和强度	190
第一节 应力-应变试验	190
一 导论	190
二 模型	191
三 压缩和剪切试验与拉伸试验的关系	192
四 温度的影响	194
五 试验速度和破坏包络线	196
六 静压的影响	200
七 分子量和支化的影响	201
八 交联的影响	203
九 结晶度的影响	207
十 增塑和共聚合的影响	209

十一	分子取向	210
十二	复合聚合物、嵌段和接枝聚合物	214
第二节	脆性破坏和应力集中体	216
一	应力集中体	216
二	破坏理论	217
第三节	屈服和冷拉伸理论	219
第四节	冲击强度和撕裂	225
一	冲击试验的性质	225
二	缺口的影响	226
三	温度的影响	229
四	取向的影响	230
五	影响冲击强度的其它因素	231
六	复合聚合物的冲击强度	232
七	撕裂	234
第五节	小结	235
第六节	习题	236
参考文献		240
第六章	其它力学性质	252
第一节	热变形温度	252
第二节	疲劳	257
第三节	摩擦	260
第四节	磨损、磨损和抗划痕性	264
第五节	硬度和硬度试验	268
第六节	小结	272
第七节	习题	273
参考文献		275
第七章	微粒填充高分子物	280
第一节	复合材料导论	280

第二节 悬浊液的流变性	281
第三节 粘度和剪切模量间的关系	285
第四节 填充高分子材料的模量	286
一 正规体系	286
二 反转系和相反转	291
三 复合材料模量的误差	295
四 实验举例	297
第五节 强度和应力-应变特性	298
一 刚性填充剂	298
二 复合聚合物、嵌段聚合物和泡沫材料	305
第六节 蠕变和应力松弛	307
第七节 动力学性质	310
第八节 其它力学性质	316
一 冲击强度	316
二 热变形温度	317
三 硬度和磨损	318
四 热膨胀系数	319
第九节 小结	321
第十节 习题	322
参考文献	326
第八章 纤维填充的复合材料及其它复合材料	335
第一节 导论	335
第二节 纤维填充的复合材料的弹性模量	336
第三节 纤维填充的复合材料的强度	344
一 单轴取向纤维	344
二 无规取向纤维复合材料和层积材料	350
第四节 其它性质	353
一 蠕变	353

二 疲劳	354
三 热变形温度	354
四 冲击强度	355
五 热膨胀系数	358
第五节 条带填充复合材料	360
第六节 其它类型的复合材料	364
一 薄片填充高分子材料	364
二 厚中间层的复合材料	365
三 相互穿透性网状结构复合材料	366
第七节 小结	367
第八节 习题	368
参考文献	370
附录	377
附录 1 普通高分子的化学结构	377
附录 2 模量、应力和粘度的换算系数	379
附录 3 高分子的玻璃化转变温度和熔点	380
附录 4 各向异性材料的工程模量和张量模量 及张量柔量之间的关系	383
附录 5 符号表	386

第一章 力学试验和高分子物质的转变

第一节 导 论

多数高分子材料,因为价格低廉,并具备合乎需要的力学性能,所以得到了广泛的应用。对于高分子材料的大多数用途来说,在其所有的物理和化学性能中,其力学性能可以说是最重要的。因此使用高分子材料的工作人员,至少需要具有这类材料的力学性能的基础知识,并应懂得怎样通过许多结构因素来改变它的力学性能。

附录 1 中列出了一些高分子物质的化学结构。高分子物质和所有已知的其它材料比起来,它所具有的力学性质种类和范围最为广泛。高分子物质从液体和柔软的橡胶到非常坚硬而难以变形的固体都有。决定这些材料的力学性能的结构因素是非常多的。本书的主要目的之一是说明除化学组成外,下述结构因素将怎样影响高分子的主要力学性质。

这些结构因素有:

- 1 分子量
- 2 交联和支化
- 3 结晶性和结晶形态
- 4 共聚合(无规、嵌段和接枝)
- 5 增塑
- 6 分子取向性

7 填充剂

除上述结构和分子的因素之外,下述环境变化或外界条件变化,对力学性能也有重要的影响,如:

- 1 温度
- 2 时间、频率(振动数)或应力速率
- 3 压力
- 4 应力和应变的幅度
- 5 变形的种类(剪切、拉伸、双轴等)
- 6 热处理或热履历
- 7 周围大气的性质

高分子材料的许多性质和其它材料(如金属)的性质的差别,是它对温度和时间具有强烈的依赖关系。这种对温度和变形速度(时间尺度)的强烈依赖现象,是由于高分子具有粘弹性的结果。所谓粘弹性,就是具有类似于粘性液体和纯弹性固体两者的性质,而粘性液体具有作用力与变形速度成比例的性质,纯弹性固体具有作用力和变形成比例的性质。对粘性系统所作的功是完全转化成热能而消耗掉的;与之相反,对弹性系统做功,如拉伸弹簧等,所有的功都以位能形式贮存起来。高分子物质就具有这样的两重性,以致它的力学性能是非常复杂而又有趣的。由于力学试验的多种多样和上述的多种影响因素,高分子物质力学性质的研究,如果不是因为有一些一般现象和经验方法使问题大大简化,那就会变得非常复杂。

第二节 力学试验

力学试验方法和试验仪器之多是惊人的。这些实验大多数是非常专门的,而且还没有被正式公认为标准试验。可

是有些试验已经标准化,并刊载于美国材料试验协会^[1] (American Society for Testing and Materials) 的出版物上。塑料的许多重要试验已作为美国材料试验协会标准刊登在一系列的 ASTM 会志上。表 1-1 中列出了载有高分子材料标准试验的重要卷(部)号。虽然很多试验已经标准化了,但要认识到,标准化了的试验,并不一定都比没有标准化了的好。标准化的一个目的,是使试验的实施简单和一致,但这种标准试验对于产生最基本的资料或对某一研究题目产生专门的资料,并不一定是最完善的。在某些情况下,这些试验甚至可能与实用的试验毫不相关。

表 1-1

ASTM 标准

部 号	试 验 的 材 料
15	纸、包装物
16	多层结构建筑材料、木料、粘结剂
20	油漆-材料规格和试验
21	油漆-定型材料和应用涂层的试验
24	织物-纱线、编织物
25	织物-纤维
26	塑料-规格
27	塑料-试验方法
28	橡胶
29	电器绝缘材料

除 ASTM 的标准试验外,有关试验和有关高分子和粘弹性物质力学性能的一般参考书也已出版了不少^[2-7]。除了多种试验外,还采用了大量不同的单位来报道力学试验的结果。应力、弹性模量及其它性质,使用的单位有: MKS(SI)制、cgs 制以及英制。它们之间的换算关系列入附录 2。

一 蠕变试验

蠕变试验,能提供极为重要的实用资料,同时也能使对高

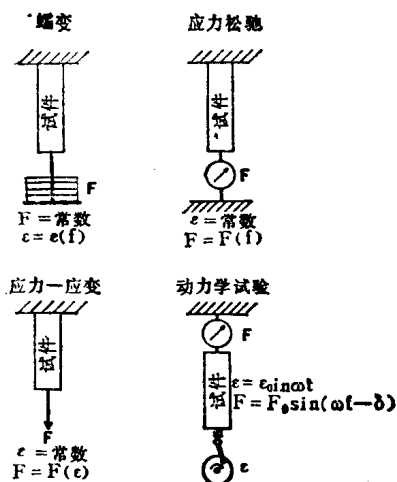


图 1-1 各种拉伸试验略图

F = 力 ε = 应变或伸长

虽然加的负荷是一定的,但在试样的厚度方向各点的应力是不同的。图 1-2 说明了这些不同种类的蠕变试验。在蠕变试验中,变形是随着时间的延长而增大的。如用所加应力去除以应变,可求出柔量。柔量是一个和弹性模量成倒数并与时间有连带关系的量,用符号 J 表示(有人把剪切柔量用 J 表示,把拉伸柔量用 D 表示,本书不作这样的区分)。

从蠕变试件上除去负荷

分子材料的力学性能理论有兴趣的人员得到有用的数据。如图 1-1 所示,在蠕变试验中,测出了某一段时间内,材料在一定负荷或一定力的作用下,产生的形变。大多数蠕变试验是在一定拉伸力作用下,测定试件长度的变化,但也可进行剪切、扭曲、压缩的蠕变试验。材料非常硬和非常脆时,采用弯曲蠕变试验。在这种情况下,

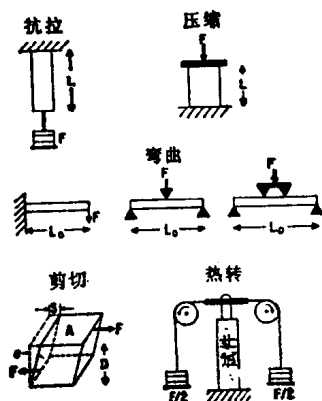


图 1-2 蠕变试验类型